

Title	Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Dual Phase Steel Composed of Ferrite and Martensite(Abstract_要旨)
Author(s)	Myeong-Heom, Park
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2017-03-23
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k20367
Right	学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2020-03-31に公開; 許諾条件により要約は2018-03-20に公開; 許諾条件により要旨は2017-06-23に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士（工学）	氏名	朴 明駿
論文題目	Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Dual Phase Steel Composed of Ferrite and Martensite （フェライト+マルテンサイトDP鋼の変形挙動に及ぼす粒径の影響）		
（論文内容の要旨）			
<p>本論文は、軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相から成る二相（Dual Phase: DP）組織を有する低炭素鋼（Fe-2Mn-0.1C）の力学特性に及ぼす粒径の影響を調査・議論した実験研究結果を取りまとめたものであり、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。DP 鋼は優れた強度-延性バランスを有し、良好な成形性を示すため、実用材として幅広く使用されているが、その優れた力学特性の原因は明らかになっていない。本研究は、DP 鋼の力学特性に及ぼす結晶粒微細化の影響を明らかにすることを目的としている。DP 鋼は高い加工硬化能を有しており、結晶化を微細化することで塑性不安定の発現を遅延して、強度と延性の両立が実現できると考えられる。したがって、微細粒 DP 鋼の力学特性を、特に加工硬化特性とその原因に着目して解明することが重要となる。しかしながら、DP 鋼は複雑な複相マイクロ組織を有するため、マクロな変形挙動をマイクロな各相の力学特性に関連づけて評価することは困難とされてきた。一方近年、画像相関（Digital image correlation method; DIC）法が開発され、変形を受けた材料中の局所ひずみを定量化することが可能となった。画像相関法は DP 鋼のひずみ解析にも有効な手段であることが報告され、マクロな変形下で各相が各々どのように変形するのかなどを調べる研究が盛んに行われつつある。また、中性子その場回折実験によってバルク複相材料中の各相の弾性ひずみを変形中にその場測定できるようになり、パーライト鋼をはじめとする種々の構造用金属材料の研究に幅広く使われては始めている。以上の二つの手法をうまく活用すれば、DP 鋼における各相のマイクロな局所変形とマクロな変形挙動を結びつけ、その優れた力学特性の根本原因を解明することが可能になると考えられる。このような背景のもと、本研究では、DP 鋼の粒径を微細化することをまず試み、結晶粒微細化によって強度と延性の両立が図れるかどうかを明らかにして、その変形挙動を画像相関法やその場中性子回折法などを駆使しながら、微視組織に関連させて明らかにするための研究を遂行している。</p> <p>第2章では、微細粒 DP 鋼の組織形成過程を明らかにしている。種々の温度でのオーステナイト化熱処理や、オーステナイト逆変態とマルテンサイト変態を繰り返す熱処理によって粒径の異なる微細粒フェライト鋼を得ることに成功した。それらをフェライト+オーステナイト二相領域で熱処理後水冷することにより、種々の粒径の DP 鋼を作製している。繰り返し熱処理によりフェライト粒径が数 μm まで微細化されることを確認し、さらに最終的な DP 組織の粒径が出発材であるフェライト鋼の粒径に強く依存していることを明らかにしている。これらの微細粒 DP 組織の作り込み手法は、加工を必要としないため、適用範囲の広い優れた方法である。</p> <p>第3章では、粒径の異なる DP 鋼のマクロな力学特性を室温引張試験により評価している。その結果、粒径が微細になるほど強度とともに延性も向上するという興味深い結果を見出している。次に画像相関法を用いて引張試験中の局所ひずみ分布を試験片スケールで定量化し、いずれの DP 鋼においても均一伸び区間ではひずみが均一に分布しているのに対し、局所伸び区間では結晶粒が微細になるほどひずみの集中が抑制さ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	朴 明駿
<p>れることを明らかにしている。すなわち、DP 鋼の結晶粒微細化によって材料全体の加工硬化能が改善され、高い強度と大きな延性の両立につながったものと考えられる。</p> <p>第 4 章では、マクロな引張変形挙動の詳細をミクロ組織と関連づけて調べている。ミクロ組織スケールで画像相関法を適用することにより、フェライトとマルテンサイト各相の塑性ひずみを定量評価している。さらに中性子その場回折実験を行い、引張変形中の各相の弾性ひずみを定量評価している。これら二つの結果から、DP 鋼の粒径が微細になるほど、マルテンサイト相およびフェライト相がより均一に変形し、かつ両相間の変形拘束によってマルテンサイトにより大きい弾性応力（内部応力）が作用することを明らかにしている。画像相関法とその場中性子回折法により得られた実験結果を組み合わせることで、DP 鋼中のフェライト相とマルテンサイト相それぞれの応力-ひずみ曲線を個別に描くことに成功し、DP 鋼における軟質フェライト相と硬質マルテンサイト相の間の力学的相互作用を初めて定量的に明らかにしている。得られた結果をもとに、DP 鋼の結晶粒微細化による均一伸びの向上は、適合性を満たすために生じる弾性応力（内部応力）に起因したマルテンサイト相の加工硬化率の飛躍的な改善によるものと結論づけている。</p> <p>第 5 章では、DP 鋼の更なる結晶粒微細化を図るために、強圧延後の再結晶によって平均粒径約 $1\ \mu\text{m}$ のフェライト組織をまず作製し、その二相域熱処理によって平均フェライト粒径 $2.7\ \mu\text{m}$ の超微細粒 DP 鋼を作製することに成功している。そして得られた超微細粒 DP 鋼の力学特性を、室温引張試験により評価している。超微細粒 DP 鋼は高い強度を示し、全伸びの低下が見られたものの、均一伸びは損なわれないことが明らかとなった。画像相関法で局所塑性ひずみを定量化し、超微細粒 DP 鋼では各相の塑性ひずみの差が小さく、より均一に変形していることを見出している。一方、マルテンサイトの塑性変形能には限界があり、超微細粒 DP 鋼ではマルテンサイト相により大きな変形が与えられるため、局部伸びが低下したものと考察している。すなわち、DP 鋼の結晶粒微細化による力学特性の向上、特に大きな引張延性の維持には限界があり、ある粒径以下ではマルテンサイト相の塑性変形限界に達して破断が生じることが明らかとなった。</p> <p>第 6 章は総括であり、本研究で得られた結果を要約し、統括している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相から成る二相 (Dual Phase: DP) 組織を有する低炭素鋼の力学特性に及ぼす粒径の影響を、画像相関法およびその場中性子回折実験から得られた各相の塑性ひずみおよび相応力 (内部応力) に関する結果に基づき調査・議論した研究結果を取りまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 適切な熱処理法の組合せにより、フェライト組織およびそれを出発材とした DP 組織の結晶粒微細化に成功した。DP 組織を結晶粒微細化することにより、強度のみならず延性も向上することを明らかにした。これは、微細化によって強度は上昇するが延性には乏しくなる従来の単相微細粒材における知見とは大きく異なり、DP 組織をはじめとする複相組織における結晶粒微細化は、機械的性質を向上させる上で極めて有効な手段になりうることを明らかにした。

2. 画像相関 (Digital Image Correlation :DIC) 法を用い、変形に伴うフェライトとマルテンサイトの塑性ひずみの変化を調べ、DP 組織の微細化によって両相がより均一に変形することを明らかにした。両相の均一変形により局所ひずみ集中が抑制されるため、全伸びが大幅に改善されることを明確に示した。

3. その場中性子回折実験を用いて引張変形中のフェライトとマルテンサイトの弾性ひずみから応力を評価し、マルテンサイトに非常に高い内部応力が生じ、また結晶粒が微細になるほどマルテンサイトの応力がより上昇することを明確に示した。

4. DIC より求めた各相の塑性ひずみと、その場中性子回折実験より求めた各相の弾性応力 (内部応力) の結果を組み合わせることで、DP 鋼全体の応力-ひずみ曲線を、フェライトとマルテンサイトそれぞれの応力-ひずみ曲線に分解することに成功した。得られた各相の応力-ひずみ曲線を基に加工硬化率を計算し、くびれ開始条件を調べることで、結晶粒微細化で実現された均一伸びの向上はマルテンサイトの高い加工硬化率に起因するものであることを証明した。これは DP 鋼の優れた加工硬化特性の本質を初めて解明した特筆すべき成果である。

以上の成果をまとめた本論文は、軟質フェライト相と硬質マルテンサイト相からなる DP 鋼の結晶粒微細化によって高強度と高延性の両立が可能であることを明らかにし、その上で画像相関法とその場中性子回折法を併用することによって、優れた力学特性の発現原因をミクロ組織と関連付けて解明したものであり、学術上寄与するところが少なくない。また、本論文で得られた成果は、DP 鋼に限らず複相組織材料一般の変形挙動解明のための指針的な役割を果たすと期待される。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 2 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成 32 年 3 月 30 日までの間) 当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。